

Motorhermodynamik

Dr.-Ing. Karl W. Najar

Universität Rostock

Lehrstuhl für Kolbenmaschinen und Verbrennungsmotoren

Wintersemester 2020 / 2021



3.2 Verbrennungsmodelle

3.2.1 Nulldimensionale thermodynamische Modelle

3.2.1.2 Wärmeübergangsmodelle

- Energiebilanz:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q}_W + \dot{W}_V + \dot{m}_{Kr,B} \cdot H_u$$

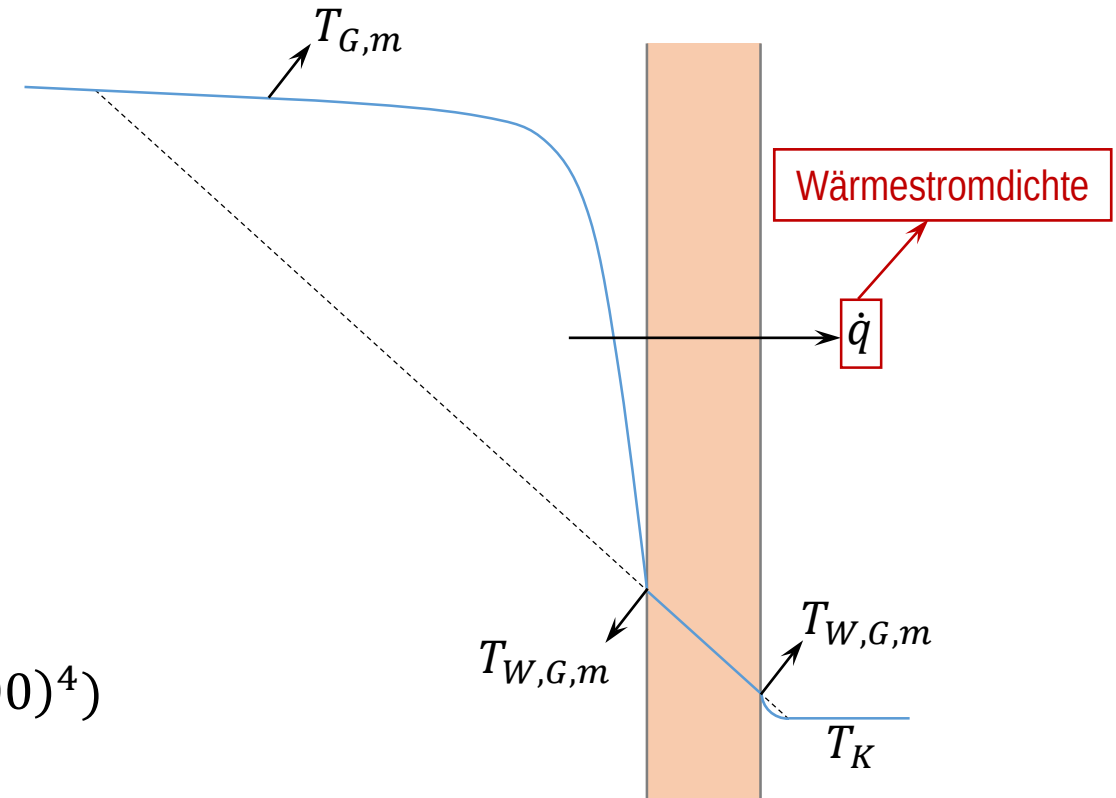
- Ruß-Strahlung!

$$\dot{Q}_W = A \cdot \varepsilon_{eff} \cdot \sigma ((T_G/100)^4 - (T_W/100)^4)$$

- Erzwungene Konvektion (Wärmeleitung in einer Grenzschicht)

$$\dot{Q}_W = \alpha \cdot A \cdot (T_W - T_G)$$

keine Betrachtung der
physikalischen Gegebenheiten!



3.2 Verbrennungsmodelle

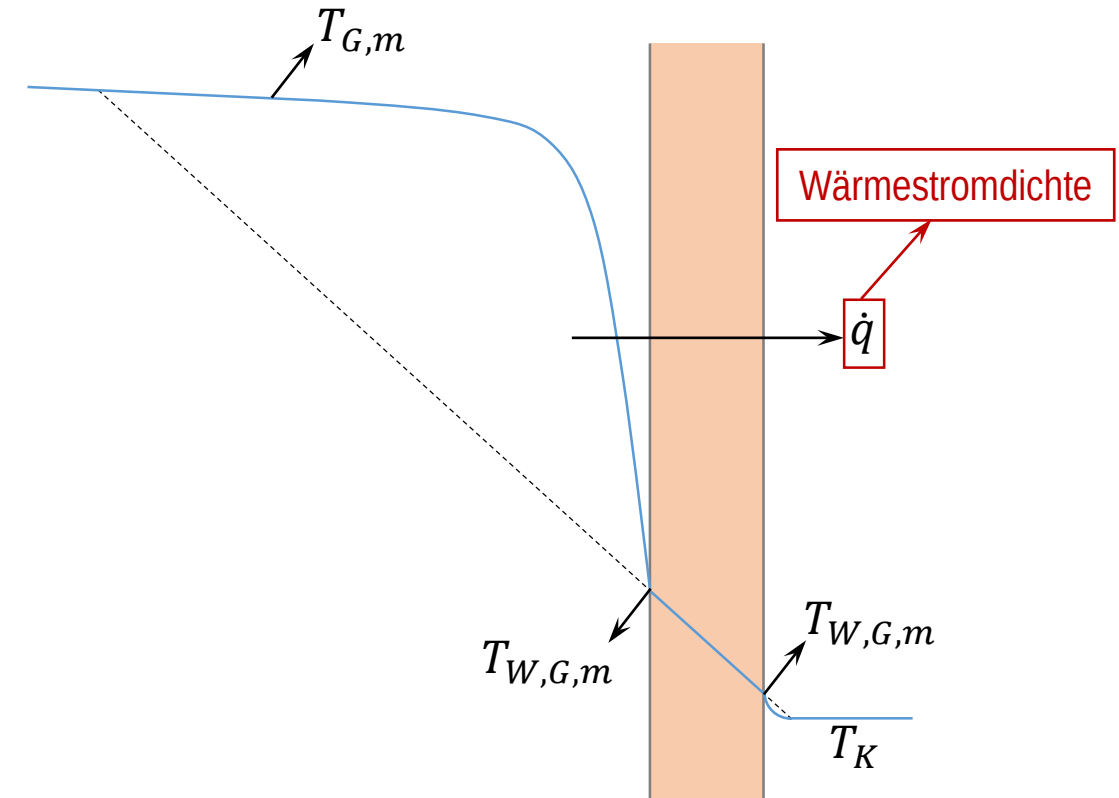
3.2.1 Nulldimensionale thermodynamische Modelle

3.2.1.2 Wärmeübergangsmodelle

$$\dot{Q}_W = \alpha \cdot A \cdot (T_W - T_G)$$

Wärmeübergangskoeffizient

- Wärmeübergangskoeffizient hängt von:
 - dem thermodynamischen Zustand des Systems
 - der Ladungsbewegung





3.2 Verbrennungsmodelle

3.2.1 Nulldimensionale thermodynamische Modelle

3.2.1.2 Wärmeübergangsmodelle

- Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten:
 - Dimensionsbehaftete experimentelle Ansätze:
 - empirische Natur
 - keine Übertragung der experimentellen Konstanten
 - Beispiel: das Modell nach Nusselt:

$$\alpha = 1,166 \cdot \sqrt[3]{p^2 \cdot T} \cdot (1 + 1,24 \cdot c_m)$$

mittlere Kolbengeschwindigkeit

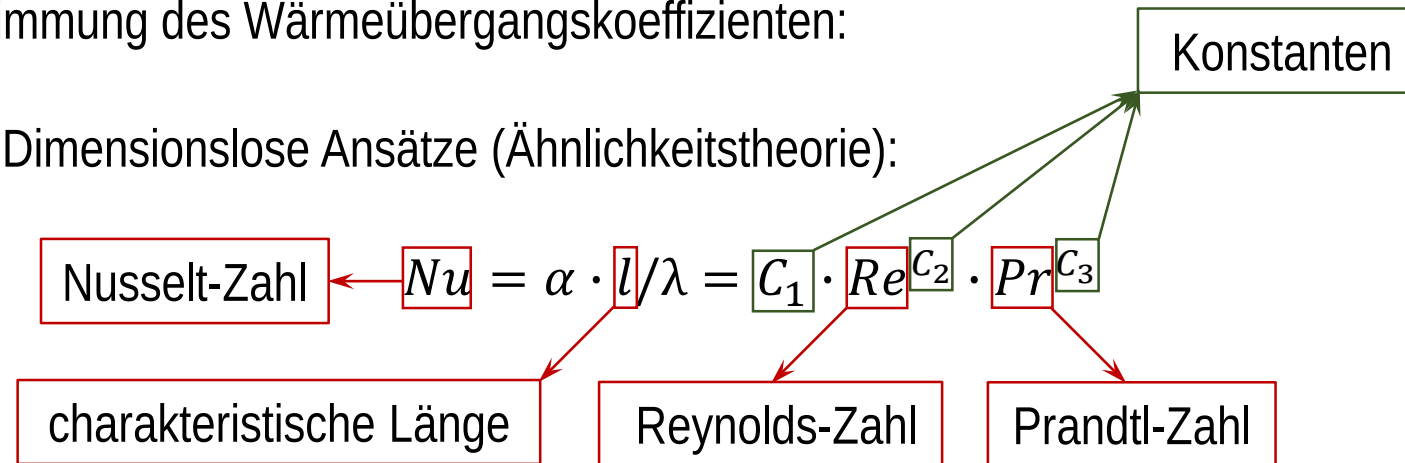
3.2 Verbrennungsmodelle

3.2.1 Nulldimensionale thermodynamische Modelle

3.2.1.2 Wärmeübergangsmodelle

- Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten:

- Dimensionslose Ansätze (Ähnlichkeitstheorie):



3.2 Verbrennungsmodelle

3.2.1 Nulldimensionale thermodynamische Modelle

3.2.1.2 Wärmeübergangsmodelle

- Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten:
 - Dimensionslose Ansätze (Ähnlichkeitstheorie):

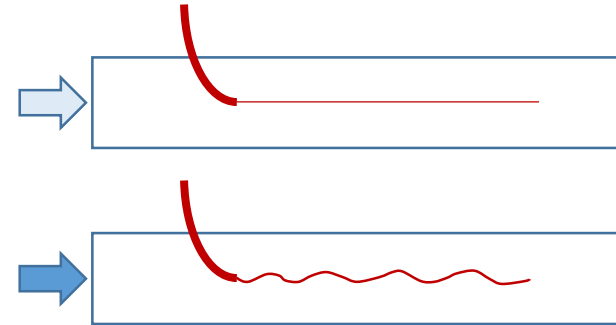
$$Re = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{viskose Kräfte}}$$

$$F_{Tr} = m \cdot a = \rho \cdot V \cdot \frac{c}{t} = \rho \cdot l^3 \cdot \frac{c}{t}$$

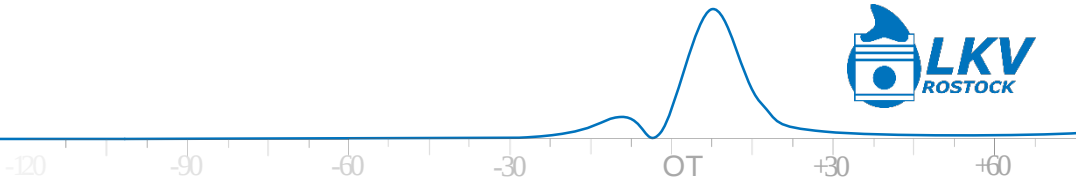
$$F_{Vi} = \tau \cdot A = \mu \cdot \frac{c}{l} \cdot l^2 = \mu \cdot c \cdot l$$

$$Re = \frac{\rho \cdot l^3 \cdot \frac{c}{t}}{\mu \cdot c \cdot l} = \frac{\rho \cdot l^2 \cdot \frac{1}{t}}{\mu} = \frac{\rho \cdot l \cdot \frac{l}{t}}{\mu}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot l \cdot c}{\mu}$$



m	Masse
a	Beschleunigung
ρ	Dichte
V	Volumen
c	Geschwindigkeit
l	char. Länge
t	Zeit
τ	Scherspannung
A	Fläche
μ	dynam. Viskosität



3.2 Verbrennungsmodelle

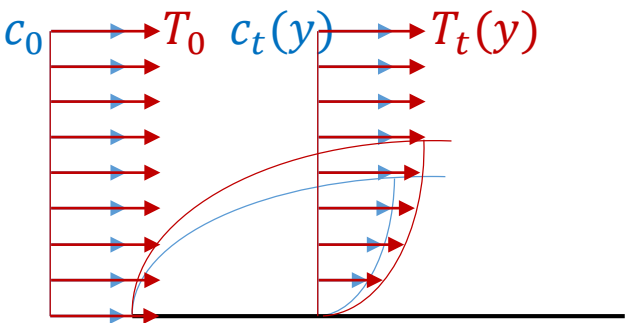
3.2.1 Nulldimensionale thermodynamische Modelle

3.2.1.2 Wärmeübergangsmodelle

- Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten:
 - Dimensionslose Ansätze (Ähnlichkeitstheorie):

Verhältnis der Strömungsgrenzschicht
zu Temperaturgrenzschicht

$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}$



<i>m</i>	Masse
<i>a</i>	Beschleunigung
ρ	Dichte
<i>V</i>	Volumen
<i>c</i>	Geschwindigkeit
<i>l</i>	char. Länge
<i>t</i>	Zeit
τ	Scherspannung
<i>A</i>	Fläche
μ	dynam. Viskosität
λ	Wärmeleitfähigkeit

$$Nu = \frac{\text{Konvektion}}{\text{Leitung}} = \frac{\alpha \cdot A \cdot \Delta T}{\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta y}} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$$

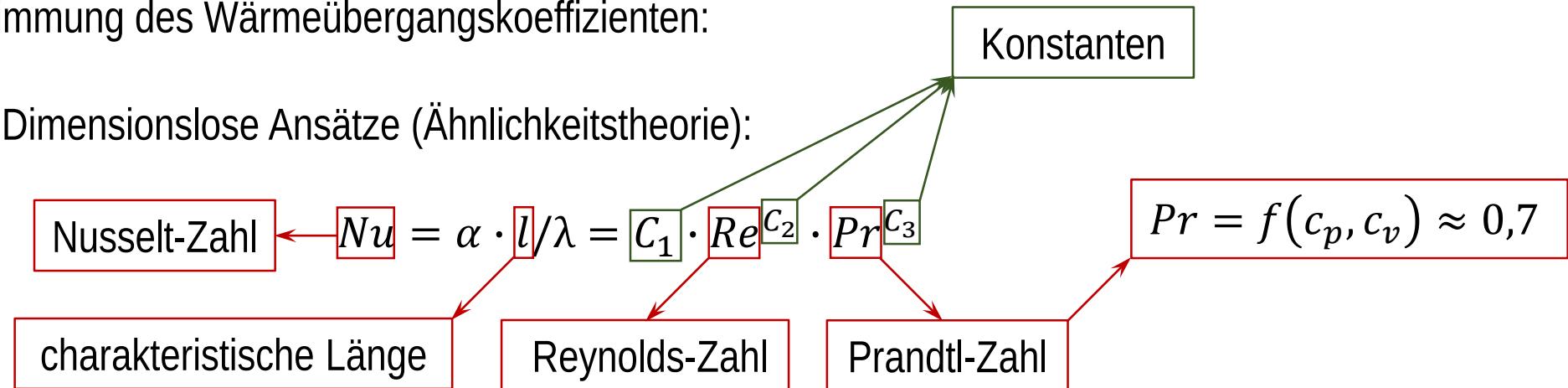
3.2 Verbrennungsmodelle

3.2.1 Nulldimensionale thermodynamische Modelle

3.2.1.2 Wärmeübergangsmodelle

- Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten:

- Dimensionslose Ansätze (Ähnlichkeitstheorie):



$$Nu = \alpha \cdot l/\lambda = C_K \cdot Re^C$$

- charakteristische Länge für Nu und Re , charakteristische Geschwindigkeit für Re ?



3.2 Verbrennungsmodelle

3.2.1 Nulldimensionale thermodynamische Modelle

3.2.1.2 Wärmeübergangsmodelle

- Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten:
 - Dimensionslose Ansätze (Ähnlichkeitstheorie):
 - Woschni-Ansatz: Ähnlichkeitsbetrachtung und temperaturabhängigen Polynomansätzen für Stoffgrößen!

$$\alpha = 130 \cdot d^{-0,2} \cdot p^{0,8} \cdot T^{-0,53} \cdot (C_1 \cdot c)^{0,8}$$

Bohrungsdurchmesser in m

Druck in bar

Temperatur in K

charakteristische Geschwindigkeit
mit Berücksichtigung des Einflusses
von Verbrennung und Drall



3.2 Verbrennungsmodelle

3.2.1 Nulldimensionale thermodynamische Modelle

3.2.1.2 Wärmeübergangsmodelle

- Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten:
 - Dimensionslose Ansätze (Ähnlichkeitstheorie):
 - Hohenberg-Ansatz: Geeignet für DI-Dieselmotoren

mittlere Kolbengeschwindigkeit als
charakteristische Geschwindigkeit

$$\alpha = 130 \cdot V^{-0,06} \cdot p^{0,8} \cdot T^{-0,4} \cdot (c_m + 1,4)^{0,8}$$

Volumen in m³

Druck in bar

Temperatur in K

charakteristische Länge



3.2 Verbrennungsmodelle

3.2.1 Nulldimensionale thermodynamische Modelle

3.2.1.2 Wärmeübergangsmodelle

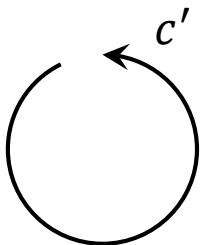
- Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten:
 - Strömungsfeldorientierte Ansätze (Ähnlichkeitstheorie):
 - Modellverbesserung durch möglichst realitätsnahe Bestimmung der charakteristischen Geschwindigkeit!
 - Bargende: Berücksichtigung der turbulenten kinetischen Energie

$$\alpha = 253,5 \cdot V^{-0,073} \cdot p^{0,78} \cdot T^{-0,477} \cdot w^{0,78} \cdot \Delta$$

charakteristische Länge

Verbrennungsterm

$$w = 0,5 \cdot \sqrt{(8 \cdot k/3) + c_m^2}$$





3.2 Verbrennungsmodelle

3.2.1 Nulldimensionale thermodynamische Modelle

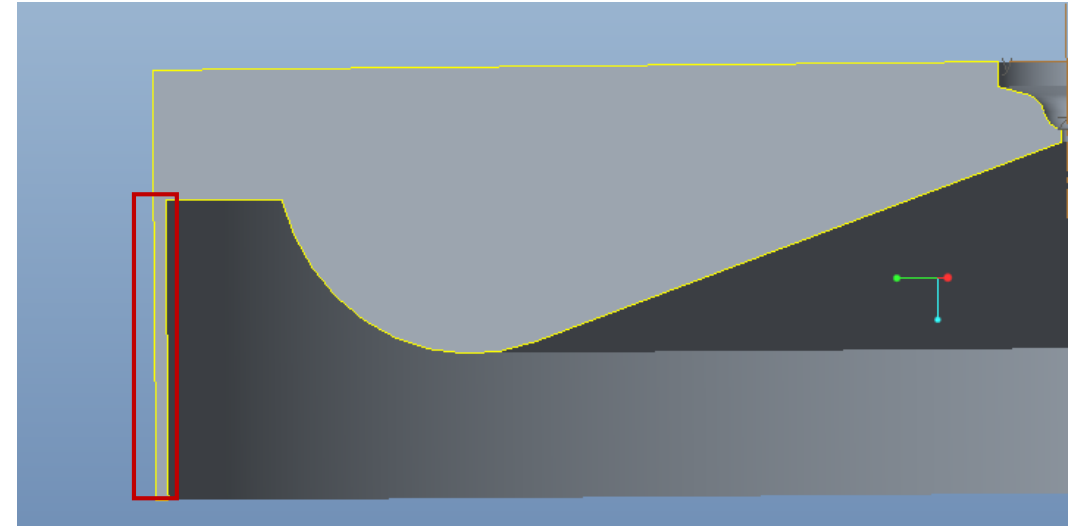
3.2.1.2 Wärmeübergangsmodelle

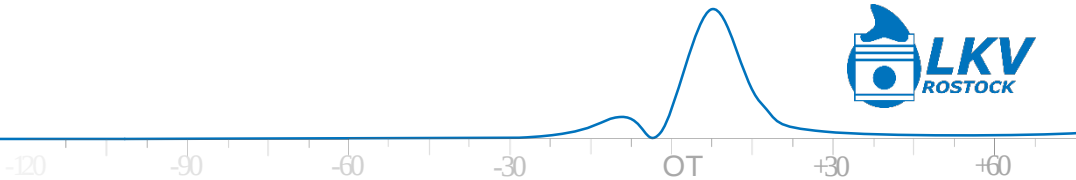
$$\dot{Q}_W = \alpha \cdot A \cdot (T_W - T_G)$$

- Kontaktfläche:

$$A = 0,3 * A_{Feuersteg} + A_{Brennraum}(t)$$

- Bestimmung der Wandtemperatur:
 - (siehe externe Folien)





3.2 Verbrennungsmodelle

3.2.1 Nulldimensionale thermodynamische Modelle

3.2.1.2 Wärmeübergangsmodelle

$$\dot{Q}_W = \alpha \cdot A \cdot (T_W - T_G)$$

- Bestimmung der Brenngastemperatur
 - Iterativ
 - Ansatz nach Zacharias:

$$T_G = r \cdot [C_1 \cdot p^2 \cdot v^2 + C_2 \cdot p \cdot v + C_3 + C_4 \cdot (p - p_0) + C_5 \cdot (p - p_0) \cdot p \cdot v] + (1 - r) \cdot [C_6 \cdot p^2 \cdot v^2 + C_7 \cdot p \cdot v + C_8 + C_9 \cdot (p - p_0) + C_{10} \cdot (p - p_0) \cdot p \cdot v]$$

$C_1 = 1,78 \cdot 10^{-10}$	$C_2 = 330,582 \cdot 10^{-5}$	$C_3 = 18,236$	$C_4 = -1,68 \cdot 10^{-6}$	$C_5 = -5,525 \cdot 10^{-12}$
$C_1 = 2,66 \cdot 10^{-10}$	$C_2 = 320,188 \cdot 10^{-5}$	$C_3 = 38,912$	$C_4 = -9,435 \cdot 10^{-8}$	$C_5 = -1,2 \cdot 10^{-11}$